Condensatoren schakelen

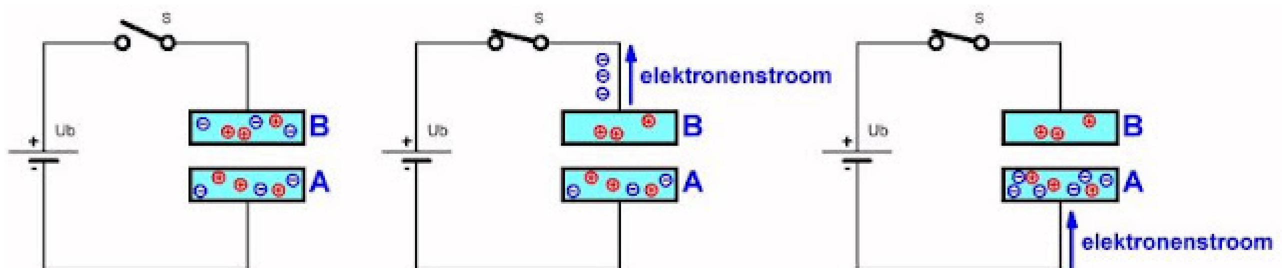
Net zoals weerstanden kunt u ook condensatoren in serie en in parallel schakelen. U kunt het laden van een condensator beïnvloeden door een weerstand in serie met de condensator op te nemen. Hierdoor ontstaat een RC-kring met speciale eigenschappen, die men integrator of differentiator noemt, afhankelijk van de R- en C-positie.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 03-12-2017

Stroom door een condensator?

Het laden van een condensator

Alvorens de serie- en parallelschakelingen van condensatoren worden besproken, moet eerst een groot misverstand opgelost worden. Vaak kunt u het begrip *'stroom die door een condensator vloeit'* lezen. Nu weet u dat een condensator bestaat uit twee geleidende platen die van elkaar zijn gescheiden door een isolator. Het is dus erg vreemd om te stellen dat er door een dergelijk onderdeel een stroom kan lopen. Immers, als u een condensator aansluit op een weerstandmeter, zult u vaststellen dat het apparaat een oneindig hoge weerstand aanwijst. Gelukkig maar, want anders was de condensator defect. Maar hoe kan een onderdeel, dat een oneindig hoge weerstand heeft, stroom doorlaten? Dit wordt verklaard aan de hand van onderstaande figuur.



Verklaring van het feit dat door een condensator tóch stroom kan vloeien. (© 2017 Jos Verstraten)

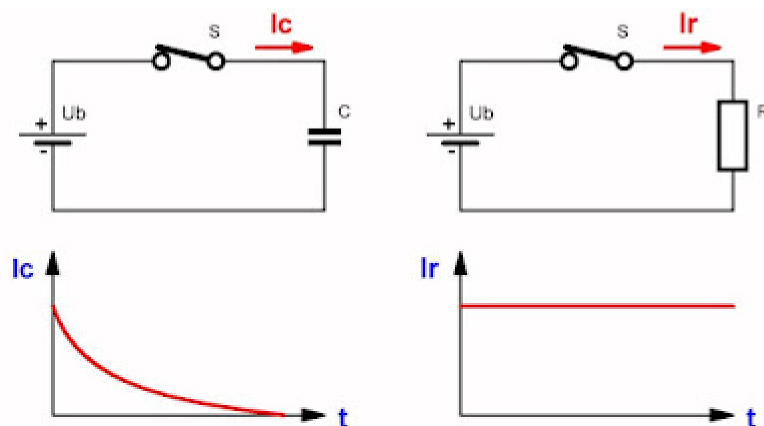
De condensator wordt via een schakelaar S aangesloten op een spanningsbron U_b. Als de schakelaar open staat gebeurt er niets. De metalen platen van de condensator bevatten uiteraard een heleboel vrije elektronen, maar die zijn in evenwicht met de positief geladen atomen, waaruit zij ontsnapt zijn. Er gebeurt niets anders dan dat er in beide platen een chaotische beweging is van elektronen, die van atoom naar atoom springen. De resulterende lading op beide platen is nul. Als u de schakelaar sluit wordt de bovenste plaat echter verbonden met de positieve pool van de spanningsbron en de onderste plaat met de negatieve pool. De vrije elektronen van de bovenste plaat zullen aangetrokken worden door de positieve lading op de positieve pool van de spanningsbron. Er ontstaat dus een stroom van vrije elektronen, die in de getekende richting van de bovenste plaat van de condensator naar de positieve pool van Ub vloeien. Die vrije elektronen worden door elektrochemische verschijnselen in de spanningsbron getransporteerd naar de negatieve pool. Van daaruit worden zij als het ware verder gestuwd naar de onderste plaat van de condensator. In de bovenste plaat van de condensator ontstaat een gebrek aan vrije elektronen, dus een

positieve lading. In de onderste plaat ontstaat een overschot aan vrije elektronen, dus een negatieve lading. Ondanks het feit dat er geen enkel elektron door het isolerende diëlektricum tussen beide platen dringt en er geen sprake is van een gesloten stroomkring, vloeien er toch vrije elektronen door de twee verbindingsdraden. Deze elektronen transporteren lading van de condensator naar de spanningsbron en van de spanningsbron naar de condensator. Het transporteren van elektrische lading heeft altijd een elektrische stroom tot gevolg. En hoewel deze 'stroom' niet door de condensator vloeit, lijkt het toch alsof er een stroom door de keten stroomt.

Van elektronenstroom naar conventionele stroom
Men zal in de dagelijkse praktijk nooit met de elektronenstroom werken, maar altijd met de conventionele stroom, gewoon *'de stroom'* genoemd. Deze loopt tegengesteld aan de elektronenstroom, in het getekende voorbeeld dus van de positieve pool van de spanningsbron naar de bovenste plaat van de condensator.

Het einde van de lading
Die stroom blijft echter niet vloeien. Door de ladingen op beide platen van de condensator ontstaat over de condensator een elektrisch veld. Dit is weer verantwoordelijk voor een potentiaalverschil tussen beide platen. In het begin is dit potentiaalverschil klein, maar naarmate er meer lading van de bron naar de condensator wordt verplaatst, wordt dit steeds groter. Op een bepaald moment is dit potentiaalverschil over de platen van de condensator net zo groot als de emk-spanning van de bron Ub. Op dat moment is er ladingsevenwicht en houdt het transport van lading, dus van elektronen, op. De *'stroom'* wordt nul.

Het verschil tussen I_R en I_C
U moet zich heel goed realiseren dat er een wezenlijk verschil bestaat tussen de stroom die door een weerstand vloeit en de stroom die door een condensator vloeit. Dit verschil is zo cruciaal dat het goed is er even dieper op in te gaan. In onderstaande figuur zijn beide situaties getekend.

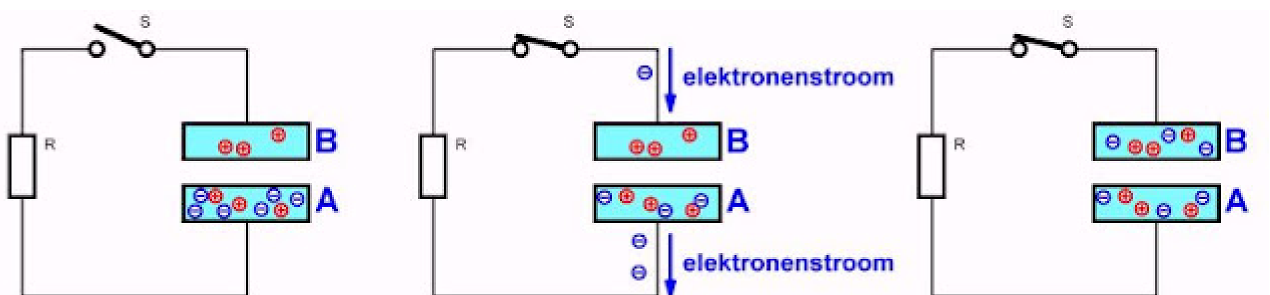


Het vergelijken van het vloeien van stroom door een weerstand en door een condensator. (© 2017 Jos Verstraten)

De stroom door de weerstand
Als u, zoals rechts getekend, een weerstand via een schakelaar S op een spanningsbron aansluit en de schakelaar sluit, dan ontstaat er een rondgaande beweging van vrije elektronen. Een vrij elektron vertrekt als het ware uit de negatieve pool van de voeding, snelt door de onderste verbinding, wurmt zich door het wrijving biedende materiaal van de weerstand, komt aan de bovenzijde weer uit de weerstand tevoorschijn en spoedt zich naar de positieve pool van de batterij. Hoewel die elektronenstroom zo groot is dat er over de weerstand een spanningsval wordt opgebouwd die gelijk is aan de emk-waarde van de bron, betekent dit niet dat de stroom ophoudt. Om de spanningsgelijkheid in de kring te handhaven moet er namelijk een constante stroom door de schakeling vloeien. Op het moment dat u de schakelaar sluit, wordt de spanningsval over de weerstand onmiddellijk gelijk aan de emk-waarde van de spanningsbron. Als u de schakelaar weer opent, valt de stroom onmiddellijk terug naar nul. Het gevolg is dat de spanningsval over de weerstand meteen gelijk wordt aan nul.

De stroom door de condensator
Nu naar de condensator. Als u de schakelaar sluit ontstaan er twee elektronenbewegingen. Een elektron vertrekt uit de negatieve pool van de spanningsbron naar de onderste plaat van de condensator. Deze plaat wordt hierdoor negatief geladen. Op hetzelfde moment vertrekt een ander elektron uit de bovenste plaat van de condensator en snelt naar de positieve pool van de spanningsbron. De bovenste plaat wordt hierdoor positief geladen. Door deze twee tegengestelde ladingen ontstaat er een elektrisch veld tussen de platen van de condensator, een veld dat verantwoordelijk is voor het ontstaan van een veldspanning over de condensator. Omdat ladingen nooit in een oneindig korte tijd van punt A naar punt B getransporteerd kunnen worden, zal de veldspanning over de condensator er een bepaalde tijd over doen om gelijk te worden aan de emk van de spanningsbron. Op het moment dat beide spanningen aan elkaar gelijk worden, houden beide elektronenstromen op te bestaan. Dit verschijnsel noemt men het *'laden van de condensator'*. Na het sluiten van de schakelaar vloeit er dus slechts heel even een stroom door de kring.
Als u de schakelaar weer opent gebeurt het volgende. De stroom was reeds nul, dus daar verandert niets aan. De beide platen van de condensator zijn echter nog steeds met zoveel lading opgeladen, dat de veldspanning over het onderdeel gelijk is aan de emk-spanning van de bron. Ook na het openen van de schakelaar blijft deze lading in de platen van de condensator aanwezig. Het gevolg is dat de veldspanning over de condensator gelijk blijft aan de emk-waarde van de spanningsbron. Een condensator, die opgeladen is tot een bepaalde veldspanning, houdt deze spanning, ook als de verbinding tussen condensator en spanningsbron wordt verbroken. Een geladen condensator kunt u dus beschouwen als een soort van batterij, die in staat is elektrisch vermogen te leveren.

Het ontladen van een condensator
Als u over de geladen condensator een weerstand parallel schakelt, zie onderstaande figuur, dan stelt u vast dat er een stroom door het circuit gaat vloeien. Een elektron uit de negatief geladen condensatorplaat spoedt zich naar de weerstand, wringt zich door het weerstand biedende weerstandsmateriaal, komt aan de bovenzijde van de weerstand weer tevoorschijn en gaat dan naar de positief geladen plaat van de condensator. Omdat het verschil in lading tussen beide platen hierdoor afneemt, zal ook de veldspanning over de condensator kleiner worden. Na een bepaalde tijd bestaat er weer ladingsevenwicht in de kring, met als gevolg dat er geen stroom meer loopt en de veldspanning over de condensator gelijk in aan nul. Dit verschijnsel noemt men *'het ontladen van de condensator'*.

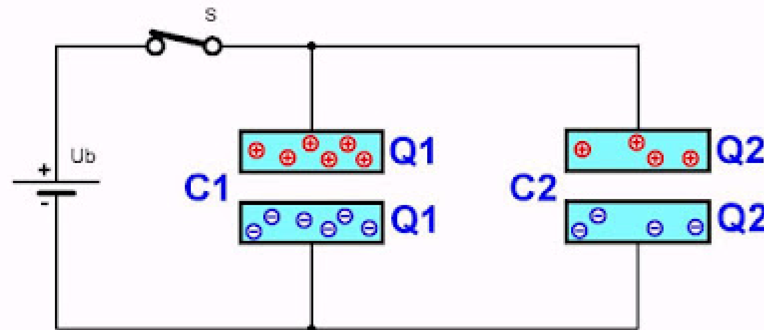


Het ontladen van een condensator. (© 2017 Jos Verstraten)

Condensatoren in parallelschakeling

Twee parallel geschakelde condensatoren
Als u twee condensatoren C1 en C2 parallel schakelt, zoals getekend in onderstaande figuur, kunt u de totale vervangingswaarde C_{tot} berekenen. Als u de schakelaar S sluit laden beide condensatoren zich op totdat hun veldspanningen gelijk zijn aan de emk-waarde van de batterij. De totale lading die verplaatst wordt is gelijk aan:
$Q_{tot} = Q_1 + Q_2$
Nu weet u uit een vorig hoofdstuk dat:

$Q = C \cdot U$
Of:
$[C_{tot} \cdot U] = [C_1 \cdot U] + [C_2 \cdot U]$
Die U is uiteraard gelijk aan de emk-waarde van de spanningsbron, zodat zij zowel links als rechts geschrapt kan worden:
$C_{tot} = C_1 + C_2$

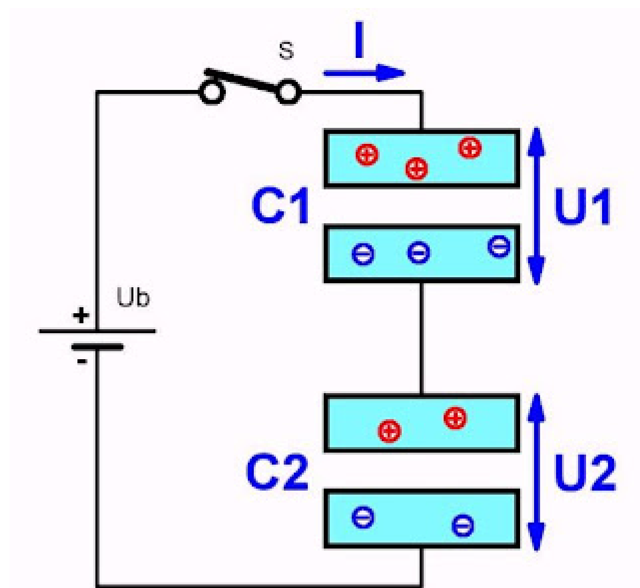


Het parallel schakelen van twee condensatoren. (© 2017 Jos Verstraten)

Meerdere condensatoren parallel
Schakelt u condensatoren parallel, dan is de vervangingswaarde gelijk aan de som van de capaciteiten. In het algemeen, bij een parallelschakeling van n condensatoren:
$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n$

Condensatoren in serieschakeling

Twee condensatoren in serie
Condensatoren kunt u natuurlijk ook in serie schakelen, zoals getekend in onderstaande figuur. Bij het verbinden van de serieschakeling met een spanningsbron loopt er even een laadstroom I door de kring. Het gevolg is dat beide condensatoren worden opgeladen en er over beide onderdelen een veldspanning ontstaat.
De som van de twee veldspanningen is gelijk aan de emk-waarde van de spanningsbron.
Dus:
$U_1 + U_2 = U_b$
Algemeen geldt echter:
$U = Q / C$
Dus:
$[Q_1 / C_1] + [Q_2 / C_2] = [Q_{tot} / C_{tot}]$
Er vloeit in de kring echter slechts één stroom I. Het gevolg is dat de ladingen over de condensatoren identiek moeten zijn. Dit is als volgt in te zien. Over condensator C_1 ontstaat een lading van Q. De bovenste plaat draagt de positieve lading van +Q, de onderste de negatieve lading van Q-. De onderste plaat van C_1 is echter rechtstreeks verbonden met de bovenste plaat van C_2. Tussen deze geleidende punten kan geen ladingsverschil bestaan. Dat is alleen het geval als de bovenste plaat van C_2 op een lading van +Q staat. Deze positieve lading veroorzaakt in de onderste plaat van C_2 een even grote negatieve lading -Q.
Gevolg:
$Q_1 = Q_2 = Q_{tot} = Q$
Invullen in de vorige formule geeft:
$[Q / C_1] + [Q / C_2] = [Q / C_{tot}]$
Links en rechts delen door Q levert:
$[1 / C_1] + [1 / C_2] = [1 / C_{tot}]$



Het in serie schakelen van twee condensatoren.
(© 2017 Jos Verstraten)

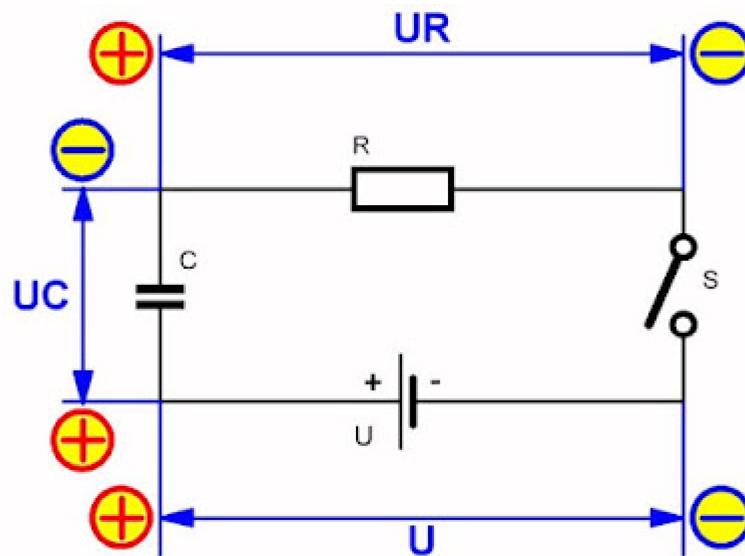
Serieschakeling van meerdere condensatoren
Meer algemeen, als u n condensatoren in serie zet, dan wordt de totale vervangingswaarde gegeven door:
$[1 / C_{tot}] = [1 / C_1] + [1 / C_2] + ... + [1 / C_n]$
Voor het speciale geval van twee in serie geschakelde condensatoren kunt u de formule ook schrijven als:
$C_{tot} = [C_1 \cdot C_2] / [C_1 + C_2]$

Conclusie

De formules voor serie en parallel schakelen van weerstanden en condensatoren zijn identiek. Het grote verschil is echter dat de formule voor het in serie schakelen van weerstanden bij condensatoren geldt voor de parallelle schakeling en vice versa.

De RC-laadkring

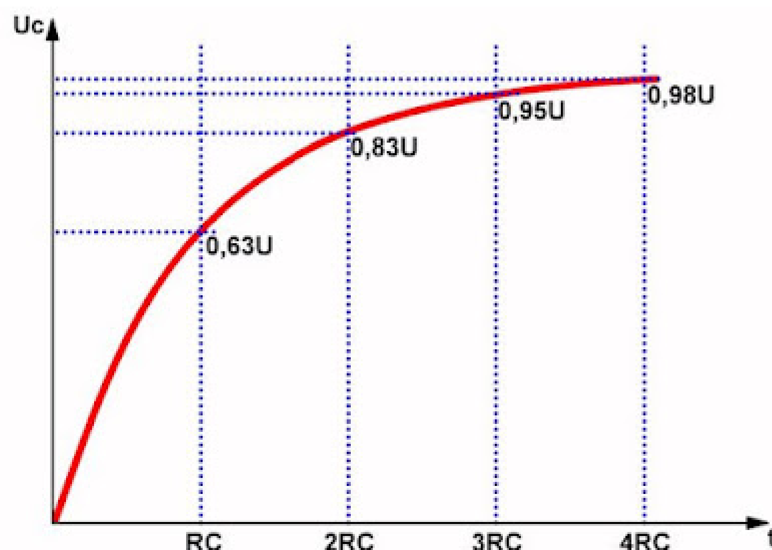
Laden van een condensator via een weerstand
Stel dat u, zoals getekend in onderstaande figuur, een condensator C en een weerstand R via een schakelaar S in serie aansluit op een spanningsbron U. U sluit de schakelaar en onderzoekt wat er in de kring gebeurt.



De RC-laadkring, aangesloten op een spanningsbron. (© 2017 Jos Verstraten)

De spanning over de condensator
Op het moment dat u de schakelaar S sluit is de spanning over de condensator uiteraard gelijk aan nul. Over de weerstand staat op dit moment de volle spanning U van de spanningsbron. Er gaat nu een laadstroom door de kring vloeien, waarvan de grootte in eerste instantie bepaald wordt door de waarde van de weerstand R. Het gevolg is dat er lading wordt getransporteerd van de spanningsbron U naar de condensator. Deze lading bouwt een spanning U_c op over de condensator met de getekende polariteit. Er staan dan twee bronnen in serie, namelijk U en U_c, die tegengestelde polariteit hebben. Het gevolg is dat de spanning over de weerstand daalt. Maar als er over een weerstand een spanningsdaling optreedt, kan dat niets anders betekenen dan dat ook de stroom daalt. De laadstroom van de condensator wordt dus kleiner, met als gevolg dat er per tijdseenheid minder lading naar van de bron naar de condensator getransporteerd wordt. Naarmate het proces vordert, zal de stroom door de kring steeds kleiner worden en de spanning over de condensator steeds minder snel stijgen.

De condensatorspanning in een grafiek
Als u een grafiekje opstelt van het spanningsverloop over de condensator in functie van de tijd, ontstaat het typische beeld van onderstaande figuur. Op t = 0 is de condensatorspanning 0 V. Eerst gaat de spanning heel erg snel stijgen. Naarmate de tijd verstrijkt gaat de spanning steeds minder snel stijgen. Na een heel lange tijd zal de spanning over de condensator precies gelijk zijn aan de spanning van de bron. De stroom in de kring wordt dan nul, het systeem is in rust. De condensator is volledig opgeladen.



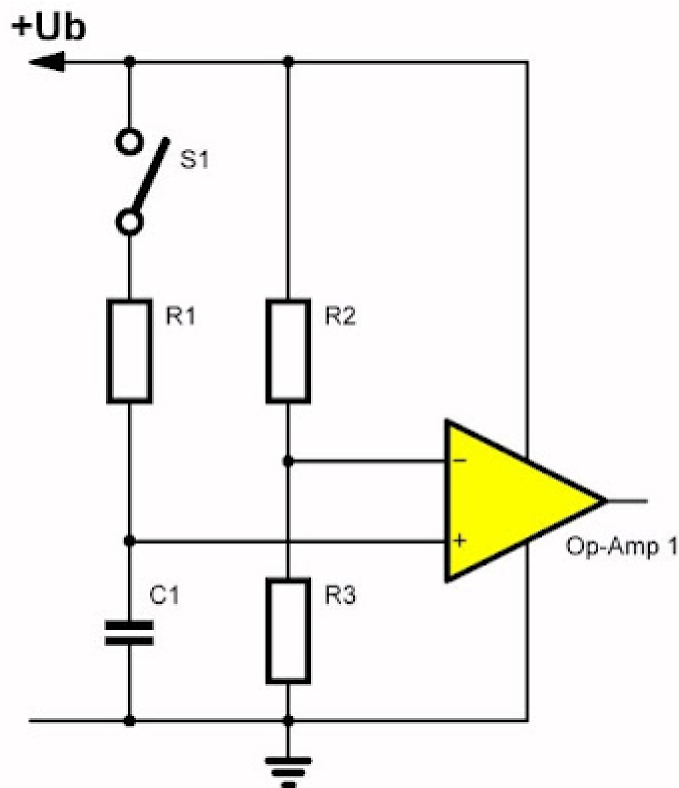
Het verloop van de spanning over de condensator. (© 2017 Jos Verstraten)

Het begrip tijdconstante

Het product van weerstand en condensator
De snelheid waarmee een en ander gebeurt is niet alleen afhankelijk van de waarde van de weerstand, maar ook van de waarde van de condensator. Immers, de spanning over een condensator wordt gegeven door de uitdrukking:
U = Q / C
Hoe groter de condensator, hoe minder snel de spanning zal toenemen. Dat dubbele verband wordt uitgedrukt door de tijdconstante van de RC-kring. De tijdconstante wordt voorgesteld door de Griekse letter τ, uitgesproken als 'tau' en gelijk aan:
τ = R • C
De definitie van deze tijdconstante is als volgt: de tijdconstante τ is de tijd die nodig is om een condensator via een weerstand op te laden tot een spanning, die gelijk is aan 63 % van de waarde U van de spanningsbron. Zoals uit de grafiek blijkt is de condensatorspanning na 4 • τ gestegen tot 98 % van de bronspanning.

De eenheid van τ
Uit de definitie van de tijdconstante volgt iets vreemds, τ is een tijd en moet dus als eenheid de seconde hebben. Maar τ is gelijk aan het product van weerstand en capaciteit. Hoe kan dit product de seconde als eenheid hebben? Toch kan dit gemakkelijk aangetoond worden.
De spanning over een condensator wordt gegeven door:
U = Q / C
Uit de definitie van lading, het vloeien van stroom gedurende een bepaalde tijd, kunt u afleiden:
Q = I • t
Dus:
U = [I • t] / C
Als u C van links naar rechts verplaatst en U van rechts naar links ontstaat:
C = [I • t] / U
Maar u weet als kenner van de wet van Ohm:
U = I • R
Dit is ook te schrijven als:
1 • U = I • R
Door het verwisselen van plaats van U en R ontstaat:
I / U = 1 / R
Dus:
C = t / R
Vul nu deze waarde van C in de formule van T in:
τ = R • [t / R]
U kunt R in teller en noemer wegstrepen:
τ = t
De tijdconstante τ is dus inderdaad niets anders dan een tijd.

Het belang van de tijdconstante
De tijdconstante τ van een RC-kring is een zeer belangrijke en praktische parameter in de elektronica. Stel bijvoorbeeld dat u ergens in een schakeling een tijdvertraging van één seconde moet realiseren tussen een eerste en een tweede verschijnsel. Dat kan door gebruik te maken van de schakeling die in onderstaande figuur getekend is.

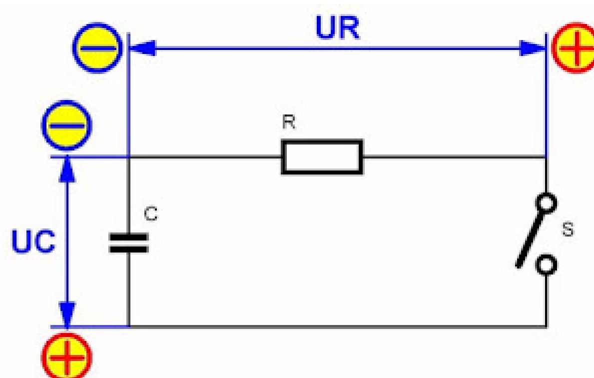


Een praktische toepassing waaruit het belang van de tijdconstante τ blijkt.
(© 2017 Jos Verstraten)

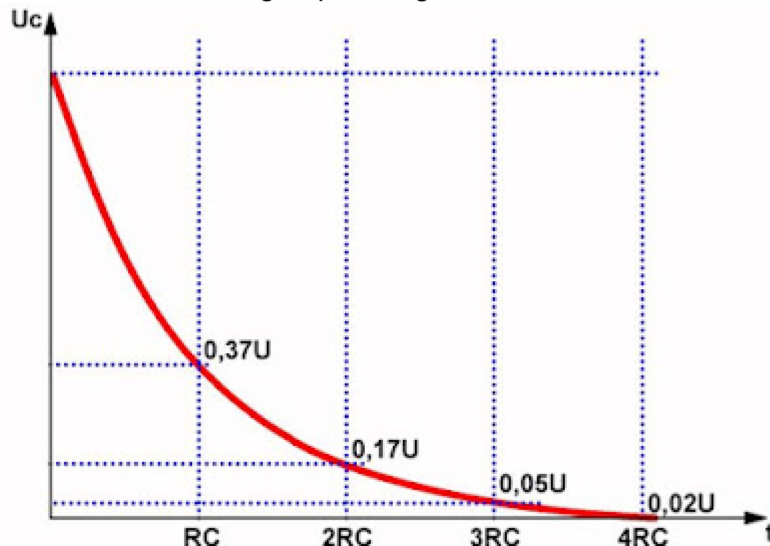
De inverterende ingang van een comparator wordt door middel van een spanningsdeler R2/R3 ingesteld op 63 % van de voedingsspanning $+U_b$. De niet-inverterende ingang van de comparator is verbonden met het knooppunt tussen de R1 en de C1 van een RC-kring. Een schakelaar S laadt, als hij wordt gesloten, de condensator C1 op via de weerstand R1. Na een seconde moet de spanning over de condensator gestegen zijn tot 63 % van de voedingsspanning. Dan zal de comparator immers na een seconde een uitgangspuls genereren. De waarde van τ is dus 1 s. Het volstaat nu eerst een waarde voor de condensator te kiezen om nadien weerstand te kunnen berekenen met de formule:
$R = \tau \;/\; C$

De RC-ontlaadkring

Het ontladen van een geladen condensator
Stel dat u een geladen condensator C door middel van een schakelaar S kortsluit over een weerstand R, zoals getekend in onderstaande figuur. U stelt de laadspanning van de condensator gelijk aan U_c. Op het moment dat u de schakelaar sluit zal er een stroom door de kring gaan vloeien. Deze stroom heeft tot gevolg dat de in de opgeslagen condensator verzamelde lading afvloeit. De spanning U_c over de condensator gaat dus dalen.



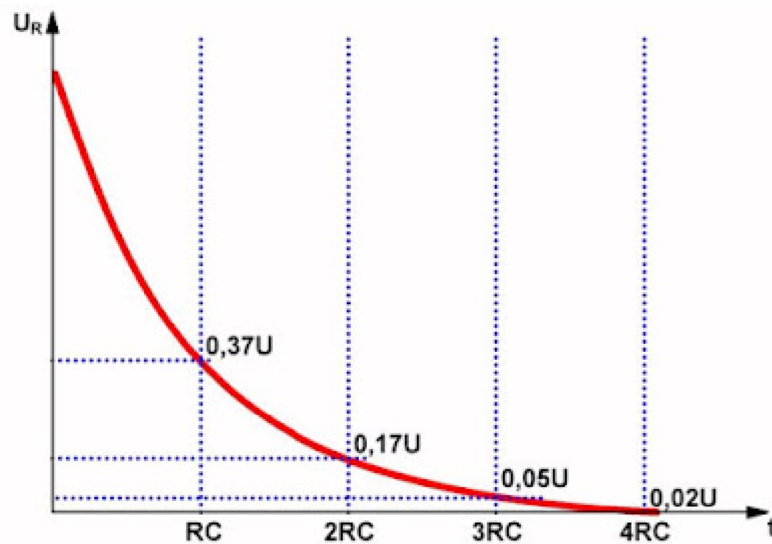
Het ontladen grafisch weergegeven
Ook nu kunt u een grafiekje opstellen waarin het verband wordt gegeven tussen het verloop van de condensatorspanning U_c en de tijd. Dit grafiekje is getekend in onderstaande figuur. Het zal geen verbazing wekken dat de condensatorspanning in het begin vrij snel daalt. De ontlaadstroom is dan immers groot. Naarmate echter de spanning daalt zal er steeds minder stroom door de weerstand vloeien en zal de spanning over de condensator dus steeds trager dalen. Maar hoe traag dat ook gaat, uiteindelijk zal de condensatorspanning gelijk worden aan 0 V. De condensator is dan volledig ontladen. U kunt vaststellen dat de condensatorspanning tot 37 % van zijn beginwaarde U_c is gedaald na één tijdconstante τ. Na 4 • τ staat er nog maar 2 % van de beginspanning over het onderdeel.



De ontlaadcurve van een condensator in een RC-kring. (© 2017 Jos Verstraten)

De spanning over de weerstand

Bij het laden van de condensator
Tot nu toe is het spanningsverloop over de condensator als belangrijke grootheid gebruikt. Maar natuurlijk zal de spanning over de weerstand ook een bepaald verloop hebben. Het zal, bij het laden uit een spanningsbron, duidelijk zijn dat de spanning over de weerstand op ieder moment van het proces gelijk is aan de constante bronspanning minus de stijgende spanning over de condensator. Dat is gemakkelijk in te zien, maar u kunt dat met de wetten van Thévenin ook bewijzen.
In het begin van de lading, als de condensatorspanning nog 0 V is, is de spanning over de weerstand gelijk aan de bronspanning. Na 1 • τ is de spanning over de weerstand gedaald tot 37 % van de bronspanning. Het grafisch verloop in functie van de tijd is getekend in onderstaande figuur.

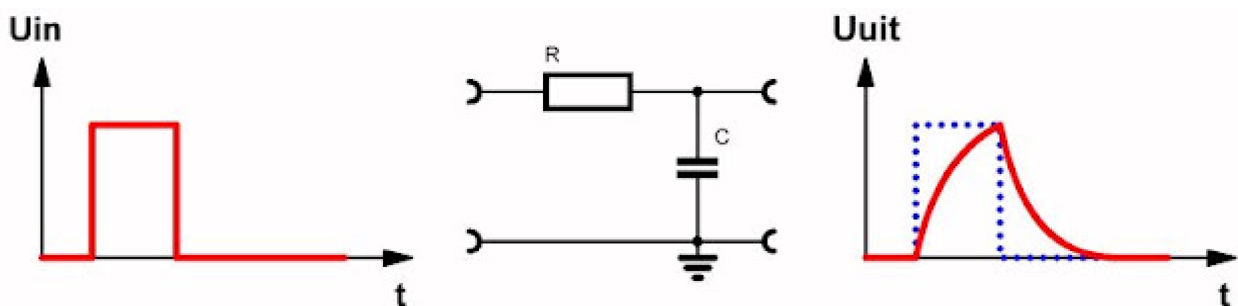


Het verloop van de spanning over de weerstand bij de RC-laadkring.
(© 2017 Jos Verstraten)

Integratoren en differentiatoren

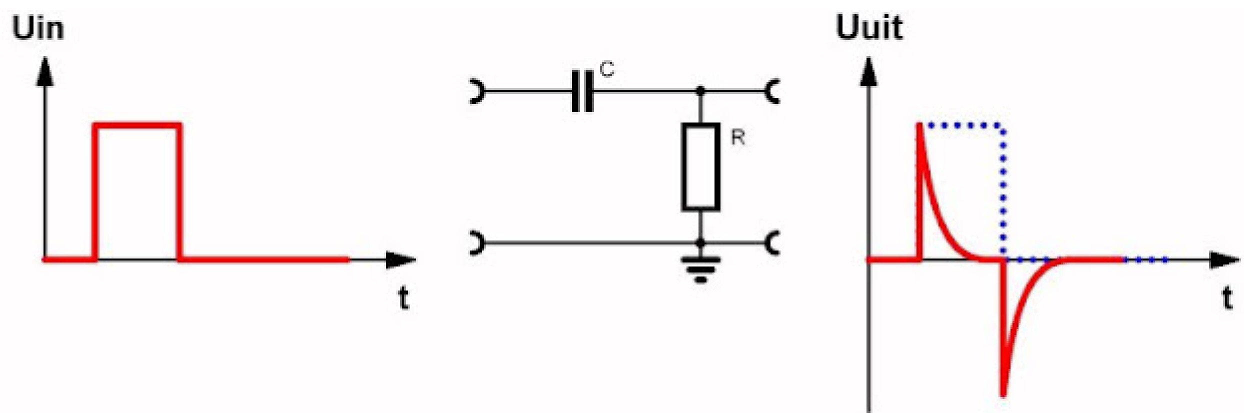
Praktische schakelingen met de RC-kring
Een RC-kring zult u vaak te hulp roepen als u iets met een pulsspanning in functie van de tijd moet doen. De twee schakelingen die u het vaakst zult toepassen zijn de integrator en de differentiator. Zowel integrator als differentiator hebben talloze toepassingen in de praktische elektronica, en dan voornamelijk in tijdschakelingen. Onderzoek maar eens twintig nabouwschakelingen die iets doen met tijd en in de meeste gevallen zult u op tal van plaatsen integratoren en differentiatoren ontdekken!

De integrator
Deze schakeling is in onderstaande figuur getekend. Het is niets anders dan de reeds bekende RC-kring, waar de spanning over de condensator als uitgang wordt genomen. Als u een smalle spanningspuls op de ingang legt zal deze smalle puls door de condensator breder gemaakt worden. Men spreekt van een integrator of integrerende schakeling.



De werking van de integrator grafisch toegelicht. (© 2017 Jos Verstraten)

De differentiator
In het onderstaande schema zijn weerstand en condensator van plaats verwisseld. De spanning over de weerstand is nu de uitgangsspanning. Als u dezelfde smalle puls aan de schakeling aanbiedt stelt u vast dat er over de weerstand twee veel smallere, naaldvormige pulsen ontstaat. De eerste is positief, de tweede is even groot en breed en negatief. De schakeling kan dus gebruikt worden als pulsversmaller. Uiteraard is de breedte van de naaldpulsen afhankelijk van de waarde van τ en dus van de waarde van de toegepaste onderdelen. Men spreekt van een differentiator of differentiërende schakeling.



De werking van de differentiator grafisch toegelicht. (© 2017 Jos Verstraten)